

# Эффективные импульсно-периодические ХеСl-лазеры

В.В.Дударев, Н.Г.Иванов, И.Н.Коновалов, В.Ф.Лосев, А.В.Павлинский,  
Ю.Н.Панченко

*Приведены результаты исследований параметров электроразрядных импульсно-периодических ХеСl-лазеров с длительностью импульсов излучения 25–40 нс, энергией 0.2–0.7 Дж и частотой следования до 100 Гц. Показано, что полный КПД лазеров 2.6% и максимальная эффективность по вложенной энергии 3.8% достигаются при удельной мощности накачки 2.8–3.3 МВт/см<sup>3</sup> и индуктивности разрядного контура 3.5–4 нГ.*

**Ключевые слова:** эксимерный лазер, мощность накачки, эффективность лазера, однородный объемный разряд, длительность и энергия импульса генерации.

## 1. Введение

В настоящее время эксимерные лазеры, являющиеся наиболее мощными и эффективными источниками когерентного излучения в УФ области спектра, используются в научных исследованиях и технологических процессах. Для широкого применения эти лазеры должны иметь достаточно высокую эффективность и обеспечивать большие плотности энергии и мощности лазерного пучка. Одновременная реализация перечисленных требований вызывает определенные трудности, особенно когда речь идет о коммерческих лазерах, работающих в импульсно-периодическом режиме, в которых используется простейшая двухконтурная схема накачки.

Эксимерный лазер на молекулах ХеСl, излучающий на длине волны 308 нм, является вторым по эффективности после КгF-лазера. Типичные значения полного КПД и удельной энергии генерации, снимаемой с активной среды, для импульсно-периодических ХеСl-лазеров составляют 1%–2% и 2.5–4 Дж/л соответственно. Данные параметры обычно реализуются при удельной мощности накачки ~1 МВт/см<sup>3</sup> и длительностях импульса 30–50 нс [1]. В то же время в работах [2–4] на экспериментальных макетах ХеСl-лазера показана возможность получения более высоких КПД и удельной энергии генерации. В [5] исследован ХеСl-лазер с рекордно высокой (45 МВт/см<sup>3</sup>) удельной мощностью накачки и плотностью разрядного тока 14 кА/см<sup>2</sup>. Однако при этом КПД лазера был очень низким (всего 0.8%), максимальная удельная энергия генерации составляла 2.4 Дж·л<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup>, а интенсивность выходного пучка была равна 4.8 МВт/см<sup>2</sup>. В работе [6] при использовании УФ предыонизации в ХеСl-лазере был достигнут рекордный полный КПД, составивший 2.9% при интенсивности выходного пучка 6.5 МВт/см<sup>2</sup>, но при довольно

низкой удельной энергии генерации (0.6 Дж·л<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup>). Максимальный КПД был реализован при плотности мощности накачки 3.77 МВт/см<sup>3</sup>. С повышением давления смеси от 4 до 6 атм и зарядного напряжения от 18 до 36 кВ КПД лазера снижался до 1.8%, однако удельный энергоотъем и интенсивность выходного излучения возрастали до 1 Дж·л<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup> и 15.7 МВт/см<sup>2</sup>. В работе [7] нами были получены рекордная удельная энергия генерации, около 3.9 Дж·л<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup>, и высокая интенсивность излучения лазерного пучка – 14.9 МВт/см<sup>2</sup>. Эти значения были реализованы при зажигании разряда, состоящего из множества диффузных каналов. Удельная мощность накачки в каналах при этом оценивалась в 10 МВт/см<sup>3</sup>, а плотность разрядного тока – в 5 кА/см<sup>2</sup>. К сожалению, КПД лазера с такой активной средой был невысок – всего 1.2%.

Следует отметить, что во всех представленных выше работах КПД лазера существенно снижался при достижении максимальной удельной энергии генерации с активной среды. Кроме того, экспериментальные результаты были получены на макетах лазеров, работающих в однократном режиме, что безусловно облегчало реализацию рекордных параметров за счет минимизации индуктивности в разрядном контуре накачки. В коммерческих импульсно-периодических лазерах к разрядному контуру накачки предъявляются дополнительные требования, которые приводят к вынужденному увеличению индуктивности разрядного контура.

В связи с этим задача повышения эффективности работы импульсно-периодических лазеров с высокой интенсивностью излучения остается несомненно актуальной. Настоящая работа посвящена исследованию трех типов импульсно-периодических ХеСl-лазеров, разработанных в ИСЭ СО РАН (Томск), с целью установления оптимального режима накачки для одновременного достижения высокой эффективности генерации и большой интенсивности излучения.

## 2. Экспериментальные установки и методики измерений

Созданные нами лазеры работают с частотой следования импульсов 1–100 Гц при энергии импульса 0.2–0.7 Дж [8–13]. На рис.1 представлен один из этих лазеров –

В.В.Дударев, Н.Г.Иванов, И.Н.Коновалов, В.Ф.Лосев, А.В.Павлинский, Ю.Н.Панченко. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: losev@ogl.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 3 августа 2010 г, после доработки – 11 мая 2011 г.



Рис.1. Внешний вид лазера EL-500-100.

EL-500-100. Управление параметрами лазера и смена лазерной смеси осуществляются по команде компьютера. Для нахождения оптимального режима накачки проводились эксперименты с изменением параметров электрической цепи, профиля, длины и межэлектродного зазора основных электродов и электродов предыонизации, зарядного напряжения, состава и давления лазерной смеси. Результаты данных исследований легли в основу наших разработок.

Для создания лазерной активной среды (зажигание объемного разряда) используется двухконтурная электрическая схема с автоматической УФ предыонизацией разрядного промежутка (рис.2). В лазерах различных типов накопительная емкость  $C_1$  варьировалась от 48 до 107 нФ, разрядная емкость  $C_2$  – от 22 до 72 нФ. В лазере EL-200-50 емкость  $C_1$  состоит из конденсаторов КВИ-3, а  $C_2$  – из конденсаторов УНВ-6А (2700 пФ, 30 кВ). В остальных лазерах использовались только конденсаторы марки ТДК. Зарядка накопительной емкости  $C_1$  осуществляется от малогабаритного источника постоянного напряжения до  $U_0 = 20–25$  кВ. После зарядки емкости  $C_1$  срабатывает коммутатор и происходит импульсная зарядка разрядной емкости  $C_2$ . В качестве коммутатора используется тиратрон ТПИ1-10К/20. Индуктивность зарядного контура  $L_2 = 120–150$  нГн обеспечивает эффективную перезарядку первой емкости на вторую за достаточно длительное время (150–180 нс), обеспечивая тем самым большую ресурс работы тиратрона. При зарядке емкости  $C_2$  осуществляется автоматическая УФ предыонизация лазерного разрядного промежутка от искровых промежутков. После импульсной зарядки емкости  $C_2$  до напряжения, близкого к  $U_0$ , происходит пробой лазерного промежутка и осуществляется накачка лазера. Компоновка лазерной камеры, разрядных конденсаторов и токопроводов между конденсаторами и разрядными электродами выполнена таким образом, чтобы индуктивность  $L_3$  в разрядном контуре была минимальной (3.5–4 нГн). Малость индуктивности

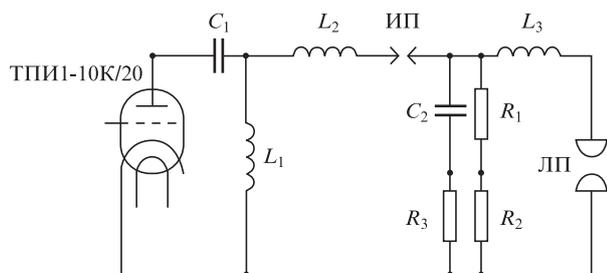


Рис.2. Электрическая схема возбуждения лазеров:  $C_1$  – накопительная емкость;  $C_2$  – разрядная емкость;  $L_1, L_2, L_3$  – индуктивности контуров;  $R_3$  – токовый шунт;  $R_1/R_2$  – омический делитель напряжения; ИП – искровые промежутки предыонизации; ЛП – лазерный разрядный промежуток.

обеспечивает наибольшую скорость нарастания разрядного тока, что очень важно для зажигания однородного объемного разряда на всей длине разрядного промежутка.

Внутри диэлектрической камеры располагаются электроды основного разряда, имеющие длину рабочей поверхности 65 см. Межэлектродное расстояние в лазерах разных типов изменялось от 22 до 28 мм. Эффективная ширина разряда варьировалась в диапазоне 5–10 мм в зависимости от величины зарядного напряжения и состава лазерной смеси. По обе стороны от основного разрядного промежутка находятся искровые промежутки для УФ предыонизации. На торцах камеры установлены зеркала плоскопараллельного резонатора с коэффициентами отражения 0.99 и 0.07, длина резонатора равна около 100 см.

Разрядная камера герметично соединяется с цилиндрическим алюминиевым корпусом, в котором находятся системы прокачки, охлаждения и очистки лазерной смеси. Все расположенные в корпусе металлические элементы и его внутренняя поверхность покрыты защитным слоем  $Al_2O_3$ , нанесенным электрохимическим способом. Газовый поток в камере создается диаметральной вентилятором, который приводится в движение электродвигателем через магнитную муфту. Скорость прокачки газа изменяется в зависимости от частоты срабатывания лазера, обеспечивая линейный рост мощности лазерного излучения при увеличении частоты. Разработанная система прокачки может обеспечивать скорости газового потока от 5 до 20 м/с. Охлаждение газовой смеси осуществляется радиаторами, через которые проходит водопроводная вода. В качестве системы очистки используется электростатический фильтр, который улавливает частицы, загрязняющие газовую смесь. В лазерах используется газовая смесь Ne–Xe–HCl–H<sub>2</sub> при абсолютном давлении 3.6–3.8 атм. Лазерная смесь готовится непосредственно в лазерной камере.

В проводимых экспериментах вольт-амперные характеристики разряда накачки регистрировались с помощью токового шунта, измеряющего ток одной из разрядных емкостей, а также омического делителя напряжения. Временная форма импульса лазерного излучения регистрировалась фотодиодом ФЭК-22СПУ. Все электрические импульсы регистрировались на осциллографах Tektronix TDS 3014, 3032. Энергия выходного излучения фиксировалась измерителем мощности и энергии Gentec-E. Распределение интенсивности излучения по сечению пучка осуществлялось с помощью диафрагмы диаметром 1 мм и фотодиода. Критериями однородности пучка являлись амплитуда и форма импульса.

### 3. Результаты и их обсуждение

При разработке данных лазеров нами были проведены предварительные эксперименты с целью поиска оптимальных условий накачки. Результаты исследований показали, что для эффективной генерации ХеСl-лазера с малой длительностью импульса излучения на полувысоте амплитуды (25–40 нс) оптимальная удельная мощность накачки должна находиться в области 2.5–3.5 МВт/см<sup>3</sup>. В связи с этим все наши исследования и последующие разработки проводились в этом диапазоне мощностей для различных длительностей импульса накачки (длительность разрядного тока на полувысоте составляла 23, 30, 35 и 39 нс) [8–10]. Для достижения плотности мощности накачки 2.5–3.5 МВт/см<sup>3</sup> необходимо обеспечивать плот-

ность разрядного тока свыше 1 кА/см<sup>2</sup>. Зажигание разряда с большой плотностью тока накладывает более жесткие требования на уровень и однородность предыонизации разрядного промежутка, однородность электрического поля в промежутке и скорость формирования объемного разряда. Поиску условий для выполнения этих требований и были посвящены наши исследования.

На рис.3 приведены типичные осциллограммы импульсов генерации, напряжения и тока на разрядной емкости  $C_2$  для трех типов разработанных лазеров. Для лазера EL-500-100 приведена также осциллограмма удельной мощности накачки, максимальное значение которой составляло 3.3 МВт/см<sup>3</sup> для объема активной среды 130 см<sup>3</sup>. Все данные соответствуют оптимальным условиям генерации каждого лазера. Из осциллограмм следует, что фронт разрядного тока для всех лазеров очень короткий и составляет 15, 24 и 26 нс соответственно. Наиболее быстрое формирование разряда (15 нс) в лазере EL-200-50 позволило сформировать в нем однородный разряд (22 нс на по-

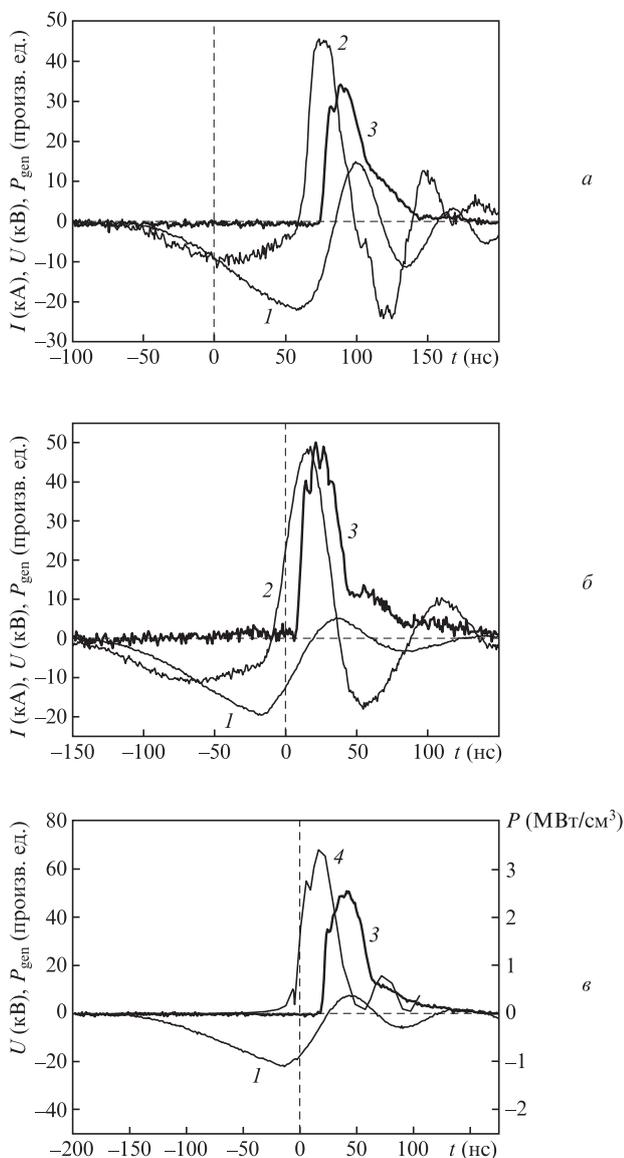


Рис.3. Осциллограммы напряжения (1) и тока (2) на емкости  $C_2$ , лазерного импульса (3) и удельной мощности накачки (4) для лазеров EL-200-50 (а), EL-350-10 (б) и EL-500-100 (в). Использовалась газовая смесь Ne:Xe:HCl:H<sub>2</sub> = 1000:15:1:0.5 для лазера EL-200-50 и Ne:Xe:HCl:H<sub>2</sub> = 800:8:1:0.5 для EL-350-10 и EL-500-100.

лувысоте) без видимых плазменных пятен на катоде [8]. Такой режим накачки позволяет существенно уменьшить эрозию электродов и увеличить срок службы лазера. С ростом энергии лазеров и увеличением длительности импульса накачки до 35 нс на катоде возникают плазменные пятна, приводящие к ухудшению однородности горения объемного разряда. Время запаздывания импульса генерации от начала импульса накачки составляет 15, 17 и 23 нс соответственно. Это время определяется скоростью роста мощности накачки и временем образования молекул ХеСl в разрядной плазме. Понятно, что для реализации наибольшей эффективности генерации лазера необходимо стремиться к минимальному времени запаздывания. Длительность импульса излучения во всех случаях продолжается в течение трех полупериодов разрядного тока. Это указывает на то, что разряд сохраняет свой объемный характер не только в первом полупериоде разрядного тока.

Наше основное внимание было обращено на повышение эффективности генерации лазеров. На рис.4. представлены экспериментальные зависимости полного КПД лазеров  $\eta$ , который определялся как отношение энергии лазерного излучения к энергии, запасенной в емкости  $C_1$ , от зарядного напряжения  $U_0$ . Видно, что для лазера EL-200-50 максимальный КПД составляет 1.8%, в то время как у двух других лазеров – 2.6%. Однако если для лазера EL-350-10 он достигался при 22 кВ, то для лазера EL-500-100  $\eta = 2.6\%$  реализовывалось при  $U_0 = 18$  кВ. С повышением зарядного напряжения до 25 кВ КПД снижался до 1.7%.

С целью определения причины снижения КПД лазера EL-500-100 был проведен анализ зависимости эффективности передачи запасенной энергии  $\eta_2$  из емкости  $C_1$  в  $C_2$  и внутренней эффективности генерации  $\eta_1$  от энергии, вложенной в разрядную плазму за первый период разрядного тока. Расчет мощности накачки и вложенной энергии осуществлялся с помощью программы OrCAD на основе экспериментальных вольт-амперных характеристик разряда и подбора переменной величины его сопротивления. Объем разряда оценивался путем перемножения длины рабочей поверхности электродов на площадь, которая соответствовала интенсивности лазерного пучка выше уровня  $1/e^2$ .

На рис.5 приведены зависимости этих эффективностей от зарядного напряжения. Здесь же для сравнения показано поведение эффективности  $\eta_1$  для лазера EL-350-10.

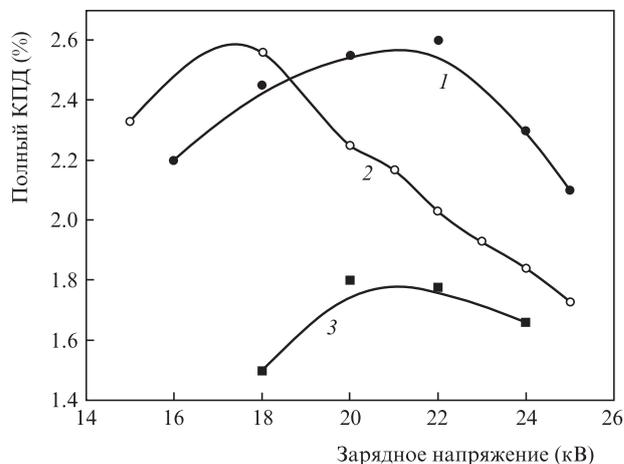


Рис.4. Зависимости полного КПД  $\eta$  от зарядного напряжения  $U_0$  для лазеров EL-350-10 (1), EL-500-100 (2) и EL-200-50 (3) при давлении оптимальной лазерной смеси  $P = 3.8$  (1, 3) и 4 атм (2).

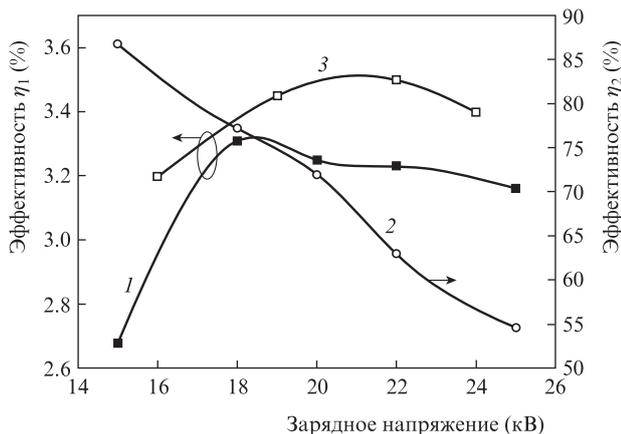


Рис.5. Зависимости внутренней эффективности генерации  $\eta_1$  лазеров EL-500-100 (1) и EL-350-10 (3), а также эффективности  $\eta_2$  передачи энергии из емкости  $C_1$  в  $C_2$  для лазера EL-500-100 (2) от зарядного напряжения.

Из рис.5 следует, что основной причиной снижения полного КПД лазера является уменьшение эффективности передачи энергии из емкости  $C_1$  в  $C_2$ . Для ее повышения зазор разрядного промежутка был увеличен с 25 до 28 мм. При большем зазоре и зарядном напряжении 24 кВ в смеси Ne:He:HCl = 900:15:1, а также при давлении 3.7 атм эффективность передачи энергии  $\eta_2$  увеличилась с 55% до 72%, а полный КПД лазера вырос с 1.85% до 2.24%. В наших экспериментах наибольший КПД был у лазера EL-350-10.

Расчет удельной мощности накачки для лазера EL-500-100 в диапазоне зарядного напряжения 24–18 кВ показал, что ее изменение за счет сужения ширины разряда было незначительным (с 3.3 до 3 МВт/см<sup>3</sup>). При дальнейшем уменьшении  $U_0$  до 15 кВ удельная мощность составила  $\sim 2$  МВт/см<sup>3</sup>. На рис.6. представлены зависимости внутренней эффективности генерации для лазеров EL-500-100 и EL-350-10 от удельной мощности накачки. Видно, что если удельная мощность накачки меньше 2 МВт/см<sup>3</sup>, эффективность лазеров резко падает. Оптимальная мощность накачки находится в диапазоне 2.8–3.3 МВт/см<sup>3</sup>. Основная причина, приводящая к меньшей эффективности генерации в лазере EL-500-100 по сравнению с EL-350-10, на наш взгляд, связана с ухудшением однородности горения разряда при увеличении длительности импульса накачки. Расчет удельной мощности накачки для лазера EL-200-50 показал, что она не превышает уровень  $\sim 3$  МВт/см<sup>3</sup>, чего при длительности импульса 23 нс недостаточно для получения более высокого КПД (см. рис.4).

Важным параметром лазеров является однородность распределения интенсивности по сечению пучка. Наши измерения показали, что форма импульса была практически одинаковой по всему сечению. Амплитуда импульса не менялась от электрода к электроду (за исключе-

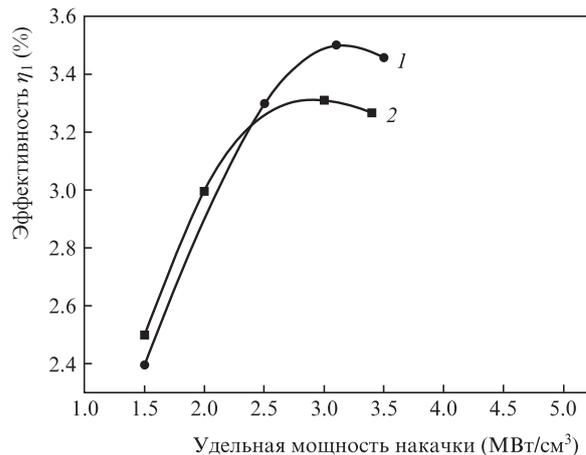


Рис.6. Зависимости внутренней эффективности генерации  $\eta_1$  от удельной мощности накачки  $P$  для лазеров EL-350-10 (1) и EL-500-100 (2).

нием прикатодной области в лазере EL-500-100) и имела практически плоскую центральную часть с резким спадом на краях в перпендикулярном направлении. Все это говорит о высокой пространственной однородности лазерного пучка.

Как уже отмечалось, в штатном режиме лазеры работают на смеси газов при давлении 3.6–3.8 атм. Исследования выходной энергии генерации в зависимости от давления лазерной смеси показали, что с ростом давления от 3.6 до 4 атм импульсная энергия также растет и для лазера EL-500-100 достигает 615 мДж, а для EL-350-10 – 415 мДж.

В табл.1 приведены основные электрические и оптические параметры разработанных лазеров. Дополнительно следует указать некоторые важные лазерные параметры, полученные в экспериментах. Удельная энергия генерации лазеров составляет 4.5–5 Дж/л, внутренняя эффективность равна 3.3%–3.6%, эффективность, определяемая по отношению максимальных мощностей генерации и накачки, достигает 3.5%–4%.

### 4. Заключение

Приведены результаты экспериментальных исследований параметров электроразрядных импульсно-периодических HeCl-лазеров серии EL. Лазеры имеют энергию импульса излучения от 200 до 700 мДж при длительности 28–35 нс и работают с частотой повторения импульсов до 100 Гц. Исследования лазеров показали следующее.

1. Оптимальная удельная мощность накачки, при которой достигается максимальный КПД лазеров с длительностью накачки 20–40 нс, находится в диапазоне 2.8–3.3 МВт/см<sup>3</sup>.
2. Во всех лазерах реализован объемный разряд с высокой однородностью, позволяющий получать генерацию в течение всей накачки (три полупериода колебания раз-

Табл.1. Электрические и оптические параметры HeCl-лазеров серии EL.

Модель лазера	$C_1$ (нФ)	$C_2$ (нФ)	$d$ (мм)	Полный КПД (%)	$\tau_{1/2}$ (нс)	$I$ (МВт/см <sup>2</sup> )	$f$ (Гц)	$E_{max}$ (мДж)
EL-200-50	48	32	22	1.8	27	9,5	50	210
EL-350-10	66	52	22	2.6	30	10	10	415
EL-500-100	107	72	25	2.15	35	8	100	615
			28	2.24	38	7	700	

Примечание:  $d$  – межэлектродное расстояние,  $\tau_{1/2}$  – длительность импульса генерации на половине амплитуды,  $I$  – интенсивность выходного излучения,  $f$  – частота следования импульсов генерации,  $E_{max}$  – максимальная энергия генерации.

рядного тока). При этом длительность на полувысоте амплитуды основного импульса генерации всегда соответствует длительности импульса первого полупериода тока, но с временем запаздывания 15–20 нс.

3. Получена рекордная для импульсно-периодических ХеСl-лазеров интенсивность выходного излучения  $\sim 10$  МВт/см<sup>2</sup>.

4. Полный КПД лазеров достигает 2.6%, максимальная эффективность по вложенной энергии – 3.8%, по мощности – 4%.

5. При малой ( $\sim 20$  нс) длительности импульса накачки реализуется режим горения объемного разряда без видимых пятен на катоде. Данный режим способствует уменьшению эрозии электродов и повышению срока службы лазера. С ростом длительности импульса накачки до 35 нс при сохранении удельной мощности накачки в районе 3 МВт/см<sup>3</sup> растут яркость и размеры видимых пятен на катоде, приводящих к снижению срока службы лазера.

6. Используемая конфигурация газодинамического тракта и имеющаяся система прокачки позволяют повысить частоту следования лазерных импульсов до 200 Гц.

Авторы выражают благодарность С.А.Ямпольской, Ю.И.Бычкову и А.Г.Ястремскому за обсуждение условий накачки и выходных параметров лазеров. Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гран-

ты №10-08-00022, 10-08-90002-Бел\_а) и федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт №02.740.11.0560).

1. Борисов В.М., Брагин И.Е., Виноходов А.Ю., Водчиц В.А. *Квантовая электроника*, **22**, 533 (1995).
2. Lacour B. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2206**, 41 (1994).
3. Riva R., Legentil M., Pasquiers S., Puech J. *Phys. D.: Appl. Phys.*, **28**, 856 (1995).
4. Macarov M., Bonnet J., Pigach D. *Appl. Phys.*, **66**, 417 (1998).
5. Lo D., Xie J. *Opt. Quantum Electron.*, **21**, 147 (1989).
6. Miyazaki K., Toda Y., Hasama T., Sato T. *Rev. Sci. Instrum.*, **56**, 201 (1985).
7. Панченко Ю.Н., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф. *Квантовая электроника*, **35**, 618 (2005).
8. Bychkov Yu.I., Losev V.F., Panchenko Yu. N., Yastremsky A.G., Yampolskaya S.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5777**, 558 (2005).
9. Bychkov Yu.I., Losev V.F., Panchenko Yu.N., Yastremsky A.G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6053**, 266 (2006).
10. Bychkov Yu.I., Balbonenko E.F., Ivanov N.G., Losev V.F., Panchenko Yu.N., Yastremsky A.G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6611**, 6611 (2007).
11. Панченко Ю.Н., Лосев В.Ф., Дударев В.В. *Квантовая электроника*, **38**, 369 (2008).
12. Панченко Ю.Н., Лосев В.Ф., Иванов Н.Г., Коновалов И.Н. *Оптика атмосферы и океана*, **21**, 674 (2008).
13. Дударев В.В., Котов Ю.А., Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н., Саматов О.М. *Изв. ТПУ*, **2**, 140 (2008).